Iranian Journal of Pulses Research
Homepage: https://ijpr.um.ac.ir
Vol. 13, No. 1, June 2022, p. 37-54
Original Research; DOI: 10.22067/ijpr.v13i1.2103-1004

پژوهش‌های حبوبات ایران
سال(دوره) ۱۳ شمارهٔ۱، نیمهٔ اوّل ۱۴۰۱
صفحهٔ ۵۴-۳۷ ، نوع مقاله: پژوهشی

پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM_iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) در ایران

سمانه محمدی[۱*]، ابراهیم زینلی[۲]، افشین سلطانی[۳] و بنیامین ترابی[۴]

۱- دانشجوی دکتری رشته کشاورزی گرایش زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ fpp@gau.ac.ir
۲- دانشیار گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ e.zeinali@gau.ac.ir
۳- استاد گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ afshin.soltani@gau.ac.ir
۴- دانشیار گروه زراعت، دانشکده تولید گیاهی، دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان؛ ben_torabi@yahoo.com

تاریخ‌ها:
دریافت: ۱۳۹۹/۱۲/۲۷، بازنگری: ۱۴۰۰/۰۵/۱۰، پذیرش: ۱۴۰۰/۰۷/۲۷؛ انتشار آنلاین مقاله: ۱۴۰۱/۰۴/۰۱

نحوه ارجاع به مقاله:
محمدی، س.، زینلی، ا.، سلطانی، ا.، و ترابی، ب. ۱۴۰۱. پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM_iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد لوبیا (*Phaseolus vulgaris* L.) در ایران. پژوهش‌های حبوبات ایران ۱۳(۱): ۵۴-۳۷.

چکیده

به منظور مدل‌سازی مراحل رشد و عملکرد لوبیا با استفاده از آمار هواشناسی سطح کشور (دمای حداقل و حداکثر، مقدار تابش و میزان بارندگی) مطالعه‌ای در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان در سال ۱۳۹۵ صورت گرفت. هدف از این مطالعه پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM_iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد لوبیای معمولی به منظور بررسی اثرات عوامل آب و هوایی، خاک، مدیریت زراعی و تعیین ضرایب ژنتیکی با استفاده از زیرمدل‌های مربوط به فنولوژی، تولید و توزیع ماده خشک، روابط آب و تغییرات سطح برگ در شرایط کشور بود. برای برآورد ضرایب و ارزیابی مدل از داده‌های آزمایش‌های انجام‌شده در نقاط مختلف کشور استفاده شد. ابتدا پارامترها برآورد و سپس مدل با استفاده از یک سری داده‌های مستقل، ارزیابی شد. مقایسه مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مشاهده‌شده روز تا رسیدگی در پارامتریابی با RMSE، CV و r به ترتیب برابر با ۱۴ روز، ۱۳ درصد و ۰/۷۶ و برای عملکرد دانه به ترتیب ۶۲ گرم در متر مربع، ۲۰درصد و ۰/۸۴ درستی پارامترهای مورد استفاده را نشان داد. همچنین مقادیر RMSE، CV و r در ارزیابی مدل برای روز تا رسیدگی به ترتیب برابر با ۸ روز، ۸ درصد و ۰/۷۴ و برای عملکرد دانه به ترتیب ۵۳ گرم در متر مربع، ۱۹ درصد و ۰/۷۷، دقت شبیه‌سازی مدل را تأیید نمود. بنابراین، می‌توان از مدل SSM_iCrop2 به‌عنوان ابزار مناسبی برای بررسی سیستم‌های زراعی و تفسیر نتایج در شرایط محیطی و مدیریتی متفاوت در جهت بهبود مدیریت مزارع لوبیا در کشور استفاده نمود.

واژه‌های کلیدی: تبخیر و تعرق؛ سطح برگ؛ عملکرد دانه؛ فنولوژی؛ لوبیا

مقدمه

رشد جمعیت و تغییر الگوی مصرف، تقاضای جهانی غذا را افزایش داده و امنیت غذایی را تهدید می‌کند (Godfray *et al.*, 2010). برای حفظ امنیت غذایی، روند توسعه محصولات پروتئینی گیاهی باید با سرعت بالایی ادامه یابد تا امکان تغذیه ۲/۳ میلیارد نفر دیگر تا چهار دهه آینده وجود داشته باشد (Aiking, H. 2011). در بین حبوبات از لحاظ سطح زیرکشت و ارزش اقتصادی در جهان، مقام اول متعلق به انواع لوبیا است (Salehi, 2015). دانه لوبیای معمولی (*Phaseolus vulgaris* L.) دارای ۲۰ تا ۲۵ درصد پروتئین و ۵۰ تا ۵۶ درصد کربوهیدرات و از مهم‌ترین غذاها به ویژه در کشورهای درحال توسعه است (Majnoon Hosseini, 2008). در بین کشورهای آسیایی، چین، ایران، ژاپن، و ترکیه تولیدکنندگان عمده لوبیای معمولی هستند (Singh, 1999). طبق آمار وزارت جهاد کشاورزی (Ministry of Agriculture, 2016)، در سال ۱۳۹۵ در ایران سطح زیرکشت لوبیا ۱۱۴۵۹۳ هکتار و تولید آن ۲۲۲۷۰۵ تن بوده است. طبق گزارش Soltani *et al.*, (2020b)، در ایران با جمعیتی بالغ بر ۸۰ میلیون نفر و

* نویسنده مسئول: samamoh1367@gmail.com

قرارگیری در منطقه ناپایدار از لحاظ جغرافیایی-سیاسی خاورمیانه و وجود تحریم‌های اقتصادی ناشی از فشار آمریکا و کشورهای اروپایی بر برنامه‌های هسته‌ای، مصرف گوشت قرمز و برنج از سال ۲۰۱۰ کاهش یافته است و انتظار می‌رود با تشدید تحریم‌ها، مصرف این دو ماده کاهش بیشتری یابد. از طرف دیگر، محدودیت منابع آب و بهینه‌نبودن مصرف این منابع در جهت خودکفایی در تولید پروتئین حیوانی، توجه بیشتر به اصلاح رژیم غذایی به سمت کاهش مصرف گوشت و افزایش تولید حبوبات به ویژه لوبیا در جهت حفظ امنیت غذایی کشور را توجیه می‌کند. بنابراین، پیش‌بینی رشد و عملکرد پتانسیل لوبیا در شرایط مختلف مدیریتی و محیطی می‌تواند تأثیر به‌سزایی در توسعه و بهبود تولید این محصول در آینده داشته باشد.

عملکرد پتانسیل یک وضعیت ایده‌آل است که در آن، محصول بدون هیچ‌گونه محدودیت بیوفیزیکی به جز عوامل غیرقابل‌کنترل مانند تابش خورشیدی، دمای هوا و بارندگی رشد می‌کند. عملکرد پتانسیل را می‌توان به سه طریق محاسبه کرد: بیشترین عملکرد ثبت‌شده توسط کشاورزان، اندازه‌گیری مستقیم عملکرد به‌دست‌آمده در مزارع آزمایشی کنترل‌شده و بدون عوامل محدودکننده تحت نظارت متخصصان زراعت و شبیه‌سازی عملکرد به وسیله مدل‌های گیاهان زراعی (Lobell *et al*., 2009؛ Van Ittersum *et al*., 2013). مدل‌ها ابزار مناسبی برای توسعه روش‌های تصمیم‌گیری هستند، به ویژه به این دلیل که امکان ارزیابی طیف وسیعی از سال‌ها از لحاظ اقلیمی همراه با سناریوهای مختلف مدیریتی را فراهم می‌کنند (Sinclair *et al*., 2020). به‌طور کلی مدل‌های زراعی، ابزارهای مفیدی برای بهینه‌سازی تعامل بین ژنوتیپ، محیط و مدیریت زراعی هستند (Zhang *et al*., 2019). نکته مهم این که مدل‌ها اجازه ارزیابی ریسک اصلاح فیزیولوژیکی یا مدیریتی را در مقیاس مزارع کوچک به کشتزارها و مناطق وسیع‌تر می‌دهند (Sinclair *et al*., 2020).

مدل‌های گیاهان زراعی باید الزامات ویژه‌ای را برای استفاده در برنامه‌های توسعه و یا سیستم‌های پشتیبانی فعال در تصمیم‌گیری‌ها داشته باشند: ۱. باید مستنداتی وجود داشته باشد که مدل مربوط به دامنه جغرافیایی و زیست‌محیطی درنظرگرفته شده است، ۲. مدل باید نیاز به داده ورودی کم (یعنی پارامترهای ورودی کم) داشته باشد. این مورد ضروری است، زیرا تصمیم‌گیرندگان معمولاً داده‌های قابل‌دسترس کم و زمان کوتاهی برای دستیابی به داده‌ها قبل از ارائه مشاوره دارند و ۳. استفاده از این مدل برای افراد غیرمتخصص آسان باشد؛ به این معنی که در مدل باید پارامترهایی که احتمال تغییر آن‌ها برای سازگارشدن به دیگر سناریوهای زراعی وجود دارد، به آسانی قابل‌دسترس و قابل‌تغییر باشند، یا به عنوان یک ابزار پشتیبانی در تصمیم‌گیری استفاده شوند (Sinclair *et al*., 2020). بر این مبنا، با استفاده از پروتکل اطلس جهانی خلأ عملکرد و بهره‌وری آب (GYGA Van Ittersum *et al*., 2013؛) مدل شبیه‌سازی ساده آزمایش‌شده SSM_iCrop2 برای ایران تنظیم شد (Soltani *et al*., 2020b). این مدل برای طیف وسیعی از گونه‌های گیاهی، به طور گسترده آزمایش و ثابت شده است (Soltani *et al*., 2020a). عملکرد پتانسیل آبی (Yp) و دیم (Yw) و نیاز آب آبیاری خالص (برای شرایط آبی) گونه‌های اصلی گیاهان زراعی و باغی در ایران با استفاده از مدل SSM_iCrop2 با موفقیت شبیه‌سازی شده است (Soltani *et al*., 2020b). این مدل به اطلاعات ورودی محدود با دسترسی آسان نیاز دارد (Nehbandani *et al*., 2020). پارامتریابی مدل SSM_iCrop2 ساده است و برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد محصول به تعداد پارامترهای کمی (حداکثر ۳۷ پارامتر برای هر محصول) نیاز دارد (Soltani *et al*., 2020a; Nehbandani *et al*., 2020).

زیرمدل iCrop2 به عنوان بخشی از مدل iAgNexus است. وجه تمایز مدل SSM_iCrop2 نسبت به سایر مدل‌های موجود، بومی‌بودن آن است (Soltani *et al*., 2016). این مدل در دانشگاه علوم کشاورزی و منابع طبیعی گرگان توسط سلطانی و همکاران طراحی و ساخته شده است. در این مدل مقدار عملکرد پتانسیل بر مبنای داده‌های هواشناسی، شرایط خاک، نحوه مدیریت و پارامترهای گیاهی محاسبه می‌شود. مدل SSM_iCrop2 توانایی شبیه‌سازی مراحل فنولوژی، گسترش و پیری برگ، توزیع ماده خشک، تشکیل عملکرد و موازنه آب خاک را دارد و شبیه‌سازی را به صورت روزانه انجام می‌دهد. مدل SSM_iCrop2، مراحل سبزشدن، شروع مؤثر پرشدن دانه‌ها، پایان مؤثر پرشدن دانه‌ها، شروع پیرشدن برگ‌ها و رسیدگی را پیش‌بینی می‌کند (Soltani, 2009). در این مدل، گسترش و پیرشدن سطح برگ تابعی از دما است. تولید ماده خشک به عنوان تابعی از تابش دریافت‌شده و دما تخمین زده می‌شود و موازنه آب خاک شامل روان‌آب، رشد ریشه و افزایش عمق مؤثر استخراج آب، تبخیر از سطح خاک، تعرق و زهکشی شبیه‌سازی می‌شوند (Soltani *et al*., 2016).

برای رسم نمودار یک‌به‌یک پارامتریابی و ارزیابی مدل، نیاز به داده‌های مربوط به عملکردهای واقعی است. داده‌ها و منابعی که به منظور تخمین عملکرد واقعی یک منطقه می‌توان از آن‌ها استفاده کرد عبارتند از: داده‌های جمع‌آوری‌شده از مطالعات

میدانی، استفاده از داده‌های سازمان‌های خاص و همچنین استفاده از سنجش از دور و تصاویر ماهواره‌ای (Van Ittersum *et al.*, 2013). شبیه‌سازی‌های با کیفیت بالا با استفاده از چارچوب، به داده‌های ورودی با کیفیت (آب و هوا، خاک، مدیریت) و آمارها (سطح زیرکشت و منابع آب و زمین)، یک روش دقیق مقیاس‌بندی و یک مدل زراعی که به طور دقیق پارامتر شده باشد، نیاز دارند (Soltani *et al.*, 2020c). بنابراین هدف از این مطالعه، پارامتریابی مدل SSM_iCrop2 و ارزیابی این مدل برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد لوبیای معمولی در شرایط اقلیمی ایران بود.

مواد و روش‌ها

مدل شبیه‌سازی: در این مطالعه از مدل SSM_iCrop2 به عنوان مبنا استفاده شد که شرح کامل آن توسط Soltani & Sinclair (2012) توضیح داده شده است. مدل SSM_iCrop2 قبلاً در ایران برای لوبیا مورد استفاده قرار نگرفته است. مدل برای اجرا نیاز به یک سری ورودی دارد که در جدول ۱ نشان داده شده است. در این مدل فرض شده است که از لحاظ عناصر غذایی کمبودی وجود ندارد و آفات، بیماری‌ها و علف‌های‌هرز نیز به طور کامل کنترل می‌شوند.

فنولوژی: تولید و تسهیم ماده خشک در مدل‌های شبیه سازی گیاهان زراعی تا حد زیادی به وسیله زمان‌بندی مراحل نمو تنظیم می‌شود (Soltani & Sinclair, 2012; Sinclair *et al.*, 1991). مدل SSM_iCrop2، مراحل سبزشدن، شروع گلدهی، شروع مؤثر پرشدن دانه‌ها، پایان مؤثر پرشدن دانه‌ها، شروع پیرشدن برگ‌ها و رسیدگی را پیش‌بینی می‌کند. گیاهان برای رسیدن به هر یک از این مراحل نیاز به مقادیر مشخصی از واحد دمایی تجمعی دارند که این مقادیر به عنوان پارامترهای ورودی زیرمدل iCrop2 جهت مدل‌سازی مراحل فنولوژیک گیاهان محسوب می‌شوند. مدل، واکنش سرعت نسبی نمو در گیاه به میانگین دمای روزانه را با استفاده از یک تابع دندان مانند[1] توصیف می‌کند. پارامترهای مربوط به فنولوژی لوبیا در جدول ۵ نشان داده شده‌اند.

تغییرات سطح برگ: محاسبه‌های مربوط به سطح برگ با روشی مشابه با مدل EPIC (Williams *et al.*, 1989) انجام شد که در مدل SBEET (Soltani *et al.*, 2005) به‌کار گرفته شده بود. پارامترهای مربوط به سطح برگ لوبیا در جدول ۶ نشان داده شده‌اند.

موازنه آب خاک در زیرمدل iCrop2: مقدار آب قابل دسترس برای گیاه تحت تأثیر عمق ریشه و به تبع آن حجم خاکی است که ریشه در طول فصل رشد به آن دسترسی دارد. در زیرمدل iCrop2 برای انجام محاسبات موازنه آب خاک، خاک به صورت دولایه درنظرگرفته شده است: یک لایه فوقانی با ضخامت ۲۰ سانتی‌متر و یک لایه دوم که شامل لایه اول نیز هست و برابر با عمق مؤثر استخراج آب[2] می‌باشد. عمق لایه دوم با شروع رشد ریشه افزایش می‌یابد تا به حداکثر خود برسد. عمق خاک در زمان سبزشدن، ۲۰سانتی‌متر درنظرگرفته شده است. پس از مرحله سبزشدن به ازای هر واحد دمایی، به مقداری که جزء پارامترهای گیاهی محسوب می‌شود، بر عمق ریشه افزوده می‌شود. عمق نهایی قابل‌دسترس برای ریشه می‌تواند بر اساس مرحله فنولوژیک، عمق نفوذ ریشه، عمق خاک و یا موانع فیزیکی و شیمیایی موجود در خاک برای رشد ریشه تعیین شود (Soltani & Sinclair, 2011). در مدل فرض می‌شود که تنش آب تأثیری بر زمان تا مراحل مختلف نموی در لوبیا ندارد. پارامترهای مربوط به روابط آب-گیاه لوبیا در جدول ۲ نشان داده شده‌اند.

تولید و توزیع ماده خشک: هسته اصلی مدل‌های شبیه‌سازی گیاهی، محاسبه تولید ماده خشک است که در آن انرژی خورشیدی به انرژی نهفته در پیوندهای شیمیایی ماده خشک تولیدی، تبدیل می‌شود. در مدل تولید ماده خشک با روش ساده مبتنی بر کارآیی استفاده از نور[3] (RUE) پیش‌بینی می‌شود. مقدار PAR دریافت‌شده در هر روز (FINT) از شاخص سطح برگ و ضریب خاموشی نور (K برای PAR) براساس قانون بیر- بوگر- لامبرت در مدل محاسبه می‌شود (Sinclair, 2006).

تشکیل عملکرد: رشد دانه در دوره‌ای از شروع رشد بذر (BSG) تا پایان رشد بذر (TSG) اتفاق می‌افتد و با استفاده از روشی مشابه مدل سیریوس گندم محاسبه می‌شود (Jamieson *et al.*, 1998). مدل‌سازی سرعت رشد دانه‌ها و تشکیل عملکرد بر مبنای مفهوم افزایش خطی شاخص برداشت (Soltani & Sinclair, 2012) شبیه‌سازی‌شده است. پارامترهای مربوط به تولید ماده خشک و تشکیل عملکرد لوبیا در جدول ۷ نشان داده شده است.

1- dent-link

2- Effective extraction depth

3- Radiation use efficiency

جدول ۱- پارامترهای ورودی مورد نیاز مدل SSM_iCrop2

Table 1. Required parameters inputs for running the SSM_iCrop2 model

	پارامتر parameter	واحد Unit
روابط آب Water relations	واحد دمایی نرمالیزه‌شده که در آن رشد عمقی ریشه آغاز می‌گردد. Fraction of tuHAR for beginning root growth (frBRG)	-
	واحد دمایی نرمالیزه‌شده که در آن رشد عمقی ریشه متوقف می‌شود. Fraction of tuHAR for termination root growth (frTRG)	-
	عمق اولیه ریشه‌ها در هنگام جوانه‌زنی یا شروع رشد برگ Initial depth of roots at emergence or beginning leaf growth (iDEPORT)	میلی‌متر mm
	حداکثر عمق مؤثر استخراج آب از خاک Maximum effective depth of water extraction from soil (MEED)	میلی‌متر mm
	ضریب کارآیی تعرق Transpiration efficiency coefficient (TEC)	کیلو پاسکال kPa
	آستانه FTSW برای رشد FTSW threshold when biomass production starts to decline (WSSG)	-
	آستانه FTSW برای نمو سطح برگ FTSW threshold when leaf area development starts to decline (WSSL)	-
	مقدار ضریب اصلاح تنش کمبود آب برای سرعت نمو فنولوژیک A coefficient that specifies acceleration or retardation in development in response to water deficit (WSSD)	-
اطلاعات هواشناسی Meteorology data	حداکثر دمای روزانه Maximum temperature (TMAX)	درجه سانتی‌گراد ºC
	حداقل دمای روزانه Minimum temperature (TMIN)	درجه سانتی‌گراد ºC
	تابش خورشیدی روزانه Solar radiation (SRAD)	مگاژول بر متر مربع در روز MJ m^{-2} d^{-1}
	بارندگی روزانه Daily precipitation (RAIN)	میلی‌متر mm
اطلاعات مکانی Spatial data	عرض جغرافیایی Latitude (Latitude)	درجه degree (o)
	غلظت دی‌اکسیدکربن اتمسفر Atmosphere CO_2 concentration (CO_2)	میکرومول بر مول µmol mol^{-1}
	ضریب محاسبه کمبود فشار بخار Vapor pressure deficit calculation coefficient (VPDF)	-
	مقدار تغییر دما Temperature change (tchng)	درجه سانتی‌گراد ºC
اطلاعات خاک Soil data	شیب زمین Land slope (SLOPE)	متر در متر m m^{-1}
	ضریب تغییر بارندگی Precipitation coefficient of variation (pchng)	-
	عمق خاک Soil depth (SOLDEP)	میلی‌متر mm
	آلبدوی خاک Soil albedo (SALB)	-
	فاکتور زهکشی خاک Soil drainage factor (DRAINF)	-
	فاکتور زهکشی سطحی Surface drainage factor (SDRAINF)	-
	مقدار آب در خاک پس ازخروج آب ثقلی Soil water after release of gravitational water (DUL)	میلی‌متر در میلی‌متر mm mm^{-1}
	پایین‌ترین سطح آب خاک Lowest level of soil water (LL)	میلی‌متر در میلی‌متر mm mm^{-1}
	آب خاک در اشباع Soil water at saturation (SAT)	میلی‌متر در میلی‌متر mm mm^{-1}
	حجم محتوای آب خاک قابل دسترس برای ریشه گیاه Volumetric soil water content available for extraction by crop roots (EXTR)	میلی‌متر در میلی‌متر mm mm^{-1}

	شماره منحنی خاک Curve number (CN)	-
اطلاعات مدیریت زراعی Management operations data	تاریخ کاشت Planting date (PDOY)	روز day
	شروع تاریخ شبیه‌سازی آب خاک Start of soil water simulation date (SimDoy)	روز day
	شروع جستجو برای تاریخ کاشت Start of searching for planting date (FPDoy)	روز day
	طول مدت جستجو برای کاشت Duration of searching for planting (SearchDur)	روز day
	سطح آستانه آبیاری Irrigation threshold level (IRGLVL)	-
	تاریخ خاتمه دوره رشد گیاه Termination of plant growth date (StopDoy)	روز day
	حداقل ارتفاع آب Minimum water height (mnWH)	میلی‌متر mm
	حداکثر ارتفاع آب Maximum water height (mxWH)	میلی‌متر mm
	آب اولیه خاک در شروع شبیه‌سازی Initial soil water at start of simulation (ISW)	میلی‌متر mm

داده‌های مدیریت زراعی: اطلاعات مدیریت زراعی موردنیاز شامل تاریخ کاشت، میزان رطوبت خاک در طول شبیه‌سازی و آبیاری بود که از مقالات موجود در جدول۴ استخراج شد. در مدل SSM_iCrop2، درجه‌روز رشد (GDD) برای تعیین تفاوت بین ارقام لوبیا از نظر طول دوره رشد استفاده شد. برای این منظور، زمان حرارتی مورد نیاز از کاشت تا رسیدگی برداشت برای رقم‌های کم محصول زودرس، متوسطرس و دیررس به ترتیب ۱۳۰۰، ۱۵۰۰، ۱۷۰۰ و برای پُرمحصول به ترتیب ۱۹۰۰، ۲۱۰۰ و ۲۳۰۰ درجه سانتی‌گراد است. GDD (بر اساس دمای کاردینال لوبیا) برای هر مرحله فنولوژیکی محاسبه شد (جدول ۵).

داده‌های آب و هوایی: اطلاعات هواشناسی هر منطقه آزمایشی شامل حداقل و حداکثر دما، بارش و تابش خورشیدی روزانه از نزدیک‌ترین ایستگاه هواشناسی به محل اجرای آزمایش به‌دست آمد. سپس داده‌های پرت و ازدست‌رفته برآورد و با استفاده از نرم‌افزار WeatherMan بازیابی شد (Hoogenboom *et al*., 2004).

داده‌های خاک: در ایران هیچ پایگاه داده محلی دیجیتالی شده برای مدل‌سازی محصولات وجود ندارد؛ بنابراین اطلاعات خاک مورد استفاده برای اجرای مدل از مؤسسه بین‌المللی تحقیقات سیاست غذای HarvestChoice HC27- (IFPRI) (Koo & Dimes 2013) به‌دست آمد. اطلاعات موردنیاز خاک شامل شاخص آلبدوی خاک، ضریب زهکشی، حجم آب خاک در ظرفیت مزرعه، نقطه پژمردگی و شرایط اشباع بود. پایگاه داده خاک HC27 که در مطالعه حاضر استفاده شد، دارای وضوح ۱۰کیلومتری است. جزئیات مربوط به خاک‌های غالب در مناطق تولیدکننده لوبیا در ایران در جدول ۳ ارائه شده است.

ارزیابی مدل: با اجرای مدل و بررسی اختلاف بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده و مقادیر واقعی و تغییر پارامترهای مربوط به فنولوژی (واحد حرارتی در زمان برداشت)، سطح برگ (حداکثر شاخص سطح برگ) و شاخص برداشت (حداکثر شاخص برداشت) که با استفاده از داده‌های حاصل از پژوهش حاضر و آزمایش‌های دیگران (داده‌های مربوط به رشد و تولید لوبیا از مقالات و گزارش‌ها) برآورد شدند، پارامترهایی که کمترین اختلاف و خطا بین مقادیر شبیه‌سازی‌شده توسط مدل و مقادیر واقعی را ایجاد کردند، انتخاب شدند. سپس کارآیی مدل در پیش‌بینی رشد و نمو لوبیا با استفاده از مجموعه‌ای از داده‌های آزمایشی مستقل از داده‌های مورد استفاده در پارامتریابی در مناطق مهم تحت کشت لوبیا در کشور مورد ارزیابی قرار گرفت (جدول ۴). براساس آمار وزارت کشاورزی ۱۳۹۴-۱۳۸۰ (Ministry of Agriculture, 2016) هشت استان فارس، لرستان، مرکزی، زنجان، خوزستان، چهارمحال و بختیاری، آذربایجان شرقی و اصفهان به ترتیب با ۲۷، ۱۵، ۱۴، ۱۲، ۱۱، ۵، ۴ و ۳ درصد در مجموع ۹۱ درصد تولید لوبیا در کشور را به خود اختصاص داده و مناطق اصلی کشت و تولید لوبیا در ایران هستند (شکل ۱).

جدول ۲- پارامترهای مربوط به روابط آب-گیاه در مدل SSM_iCrop2 برای لوبیا (Soltani, 2009; Amir & Sinclair, 1991)

Table 2. Water-plant relationships parameters in SSM_iCrop2 model for bean (Soltani, 2009; Amir & Sinclair, 1991)

پارامتر Parameter	مقدار Value
عمق اولیه ریشه در مرحله سبزشدن یا شروع رشد برگ Initial depth of roots at emergence (iDEPOR, mm)	200
واحد دمایی برای شروع رشد ریشه Temperature unit for growth of roots start (tuBRG, ºC)	0.04
واحد دمایی برای توقف رشد ریشه Temperature unit for growth of roots stop (tuTRG, ºC)	0.55
حداکثر عمق مؤثر استخراج آب از خاک Effective depth of water extraction from soil (MEED, mm)	1000
ضریب کارآیی تعرق Transpiration efficiency coefficient (TEC, Pa)	5
آستانه FTSW برای رشد FTSW threshold when dry matter production starts to decline (WSSG)	0.3
آستانه FTSW برای نمو سطح برگ FTSW threshold when leaf area development starts to decline (WSSL)	0.4
مقدار ضریب اصلاح تنش کمبود آب برای سرعت نمو فنولوژیک A coefficient that specifies acceleration or retardation in development in response to water deficit (WSSD)	0

FTSW: Fraction transportable soil water

جدول ۳- خاک‌های غالب در مناطق تولیدکننده لوبیا در ایران بر اساس انتخاب سطح برداشت IFPRI (Koo & Dimes, 2013)

Table 3. Dominant soils in bean producing areas in Iran based on harvest area selection IFPRI (Koo & Dimes, 2013)

Soil code	Soc	SOLDEP	SALB	CN	DRAINF	SAT	DUL	LL
HC16-Clay MF060	0.7-1.2	600	0.05	85	0.2	0.458	0.405	0.233
HC19-Clay LF060	0-0.7	600	0.05	85	0.2	0.458	0.405	0.233
HC22-Loam HF060	>1.2	600	0.10	75	0.5	0.41	0.307	0.180
HC25-Loam MF060	0.7-1.2	600	0.10	75	0.5	0.41	0.307	0.180
HC28Loam LF060	0-0.7	600	0.10	75	0.5	0.41	0.307	0.180

Soc: کربن آلی خاک؛ SOLDEP: عمق خاک؛ SALB: آلبدوی خاک؛ CN: شماره منحنی خاک؛ DRAINF: فاکتور زهکشی؛ SAT: کسر حجمی آب خاک در حالت اشباع؛ DUL: کسر حجمی آب خاک در حد بالایی زهکشی؛ LL: کسر حجمی آب خاک در حد پایین.

کدهای خاک (HarvestChoice HC27- (IFPRI)): ۱۶= رسی، حاصلخیزی متوسط، عمق ۶۰ سانتی‌متر؛ ۱۹= رسی، حاصلخیزی کم، عمق ۶۰ سانتی‌متر؛ ۲۲= لومی، حاصلخیزی زیاد، عمق ۶۰سانتی‌متر؛ ۲۵= لومی، حاصلخیزی متوسط، عمق ۶۰ سانتی‌متر؛ ۲۸= لومی، حاصلخیزی کم، عمق ۶۰ سانتی‌متر

به منظور تجزیه و تحلیل آماری و بررسی صحت پارامترها و دقت تخمین مدل برای مقایسه داده‌های ثبت‌شده در مطالعات قبلی با داده‌های شبیه‌سازی‌شده توسط مدل، از ضریب همبستگی (r)، جذر میانگین مجموع مربعات خطاها (RMSE) و درصد ضریب تغییرات (CV%) براساس معادلات زیر استفاده شد (Soltani & Hoogenboom, 2007):

رابطه (۱):

$$RMSE(\%) = \sqrt{\left(\frac{\sum(Xi-Yi)^2}{n-1}\right)} \times \frac{100}{\bar{X}}$$

که در آن، Xi: مقدار اندازه‌گیری‌شده، Yi: مقدار شبیه‌سازی‌شده و n: تعداد مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده است که برای محاسبه RMSE استفاده می‌شوند.

رابطه (۲):

$$CV = \frac{\delta}{\mu} \times 100$$

که در آن، CV: ضریب تغییرات، δ: انحراف معیار و μ: میانگین می‌باشد.

رابطه (۳):

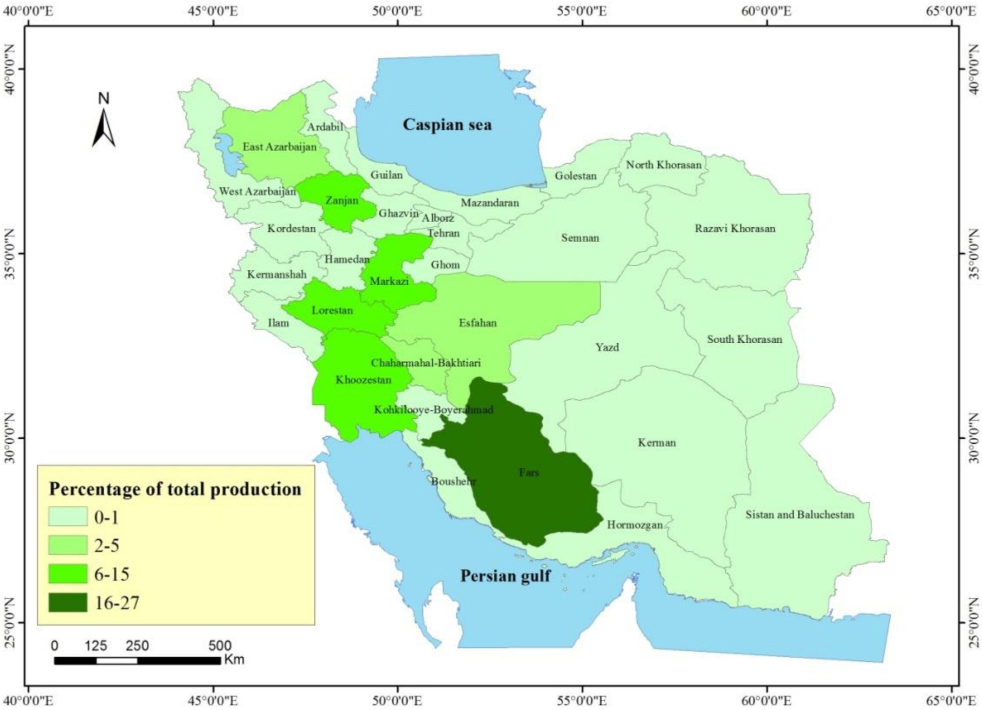
$$r = \frac{\sum_{i=1}^{n}(Xi-\bar{X})(Yi-\bar{Y})}{\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Xi-\bar{X})^2}\sqrt{\sum_{i=1}^{n}(Yi-\bar{Y})^2}}$$

که در آن، Xi: مقدار اندازه‌گیری‌شده، Yi: مقدار شبیه‌سازی‌شده، $\bar{X}$ و $\bar{Y}$: میانگین مقادیر Xi و Yi و n: تعداد مقادیر اندازه‌گیری‌شده و شبیه‌سازی‌شده است که برای محاسبه r استفاده می‌شوند.

جدول ۴- آزمایش‌های مورد استفاده برای پارامتریابی و ارزیابی مدل SSM_iCrop2 برای لوبیا در ایران

Table 4. Experiments used for parameterization and evaluation of SSM_iCrop2 model for bean in Iran

استان، محل و سال **Province, Location and Year**	تیمارها **Treatments**	منابع **Reference**	موقعیت ایستگاه عرض (**Latitude**) طول (**Longitude**)
Experiments used for model parameterization		**آزمایش‌های مورد استفاده برای پارامتریابی مدل**	
مرکزی، اراک، ۱۳۸۷-۱۳۸۸ Arak, Markazi, 2008-2009	ژنوتیپ، تنش خشکی Genotype, Drought stress	صفاپور و همکاران، ۱۳۹۱ Safapour *et al*, 2012	34.07 49.78
مرکزی، شازند، ۱۳۸۹-۱۳۹۰ Shazand, Markazi, 2010-2011	روش‌های کنترل علف‌هرز Weed control methods	حیدری و همکاران، ۱۳۹۴ Hydari *et al*, 2015	33.55 49.24
مرکزی، خمین، ۱۳۸۵-۱۳۸۶ Khomain, Markazi, 2006-2007	ژنوتیپ، تنش خشکی Genotype, Drought stress	اسدی و همکاران، ۱۳۹۰ Assady *et al*, 2011	33.39 50.04
تهران، ری، ۱۳۸۱-۱۳۸۲ Rey, Tehran, 2002-2003	ژنوتیپ، تراکم گیاه Genotype, Plant density	صادقی‌پور و همکاران، ۱۳۸۳ Sadeghipour *et al*, 2005	35.24 52.36
آذربایجان شرقی، میانه، ۱۳۸۳-۱۳۸۴ Miane, East Azarbaijan, 2004-2005	ژنوتیپ، تاریخ کاشت Genotype, Planting date	صالحی و همکاران، ۱۳۸۷ Salehi *et al*, 2008	37.45 47.7
تهران، ری، ۱۳۷۸-۱۳۸۰ Rey, Tehran, 1999-2001	ژنوتیپ، وجین و علف‌کش Genotype, Weeding and herbicide	صادقی‌پور و غفاری خلیق، ۱۳۸۱ Sadeghipur & Ghafarikhaligh, 2002	35.24 52.36
زنجان، خرم‌دره، ۱۳۸۴-۱۳۸۶ Khoramdare, Zanjan, 2005-2007	ژنوتیپ، ریزوبیوم Genotype, Rhizobium	مهرپویان و شیرانی راد، ۱۳۹۰ Mehrpoyan & Shirani rad, 2011	36.2 49.92
چهارمحال و بختیاری، شهرکرد، ۱۳۹۲-۱۳۹۳ Shahrekord, Chaharmahalvabakhtiari, 2013-2014	ژنوتیپ، کم‌آبیاری Genotype, Low irrigation	کریم‌زاده و همکاران، ۱۳۹۶ Karimzadeh *et al*,2017	32.3 50.8
Experiments used for model evaluation		**آزمایش‌های مورد استفاده برای ارزیابی مدل**	
لرستان، الیگودرز، ۱۳۸۷-۱۳۸۸ Aligudarz, Lorestan , 2008-2009	ژنوتیپ، تاریخ کاشت Genotype, Planting date	رحمانی و همکاران، ۱۳۹۱ Rahmani *et al*, 2012	33.24 49.42
فارس، شیراز، ۱۳۹۰-۱۳۹۱ Shiraz, Fars, 2011-2012	ژنوتیپ، کود نیتروژن Genotype, Nitrogen fertilizer	میرهاشمی اقدام و همکاران، ۱۳۹۲ Mirhashemi Aghdam *et al*, 2014	29.57 52.6
البرز، کرج، ۱۳۸۷-۱۳۸۸ Karaj, Alborz, 2008-2010	ژنوتیپ، کمبود آب Genotype, Water deficit	قنبری و همکاران، ۱۳۹۳ Ghanbari *et al*, 2014	35.78 50.83
مرکزی، اراک، ۱۳۹۲-۱۳۹۳ Arak, Markazi, 2013-2014	ژنوتیپ، آبیاری Genotype, Irrigation	مهاجرانی و همکاران، ۱۳۹۵ Mohajerani *et al*, 2016	34.07 49.78
چهارمحال و بختیاری، شهرکرد، ۱۳۸۸-۱۳۸۹ Shahrekord,, Chaharmahalvabakhtiari	ژنوتیپ، تنش خشکی Genotype, Drought stress	جمشیدی و همکاران، ۱۳۹۵ Jamshidi *et al*, 2016	32.3 50.8
زنجان، خرم دره، ۱۳۸۶-۱۳۸۷ Khoramdare, Zanjan, 2007-2008	ژنوتیپ، تاریخ کاشت، روش کاشت Genotype, Planting date, Planting method	مهرپویان و همکاران، ۱۳۸۹ Mehrpouyan *et al*, 2010	36.2 49.92
زنجان، زنجان، ۱۳۸۷-۱۳۸۸ Zanjan, Zanjan, 2008-2009	ژنوتیپ، تاریخ کاشت Genotype, Planting date	قنبری مطلق و همکاران، ۱۳۹۱ Ghanbari Motlaq *et al*, 2012	36.67 48.53
البرز، کرج، ۱۳۸۷-۱۳۸۹ Karaj, Alborz, 2008-2010	ژنوتیپ، کمبود آب Genotype, Water deficit	قنبری، ۱۳۹۴ Ghanbari, 2015	35.78 50.83
همدان، همدان، ۱۳۹۰-۱۳۹۱ Hamedan, Hamedan, 2011-2012	ژنوتیپ، کمبود آب Genotype , Water deficit	امیدی و سپهری، ۱۳۹۳ Omidi & Sepehri, 2015	34.87
آذربایجان شرقی، تبریز، ۱۳۸۵-۱۳۸۶ Tabriz, East Azarbaijan, 2006-2007	ژنوتیپ، تراکم گیاه Genotype, Plant density	پرویزی و همکاران، ۱۳۹۰ Parvizi *et al*, 2011	38.12 46.23



شکل ۱- مناطق اصلی تولید لوبیا در کشور براساس آمار وزارت کشاورزی (۱۳۹۵-۱۳۸۰)

Fig. 1. Major regions of bean production in the country according to the Ministry of Agriculture figures (2001-2016)

نتایج و بحث

پارامتریابی مدل

فنولوژی (روز تا رسیدگی): پارامترهای مربوط به فنولوژی لوبیا در جدول ۵ نشان داده شده‌اند. نتایج پارامتریابی مدل در مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده در برابر مشاهده‌شده روز تا رسیدگی با RMSE، CV و r به ترتیب ۱۴ روز، ۱۳ درصد و ۰/۷۶ نشان داد پارامترهای مورد استفاده، درست و منطقی هستند. بیشتر داده‌های روز تا رسیدگی در دامنه ۱۰ درصد بالا و پایین خط ۱:۱ قرار گرفتند که نشان‌دهنده برآورد صحیح پارامترهای مدل SSM_iCrop2 در تخمین مقدار روز تا رسیدگی لوبیای معمولی در ایران است (شکل ۲). دامنه تغییرات روز تا رسیدگی لوبیا در پارامتریابی برای داده‌های مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده به ترتیب بین ۷۸ تا ۱۲۸ و ۶۹ تا ۱۳۷ روز با میانگین ۱۰۲ و ۱۰۰ روز بود که نشان‌دهنده درستی میزان پراکندگی داده‌های مدل و نزدیک‌بودن پیش بینی مدل به واقعیت است.

مطالعات متعدد نتایج مشابهی از پارامتریابی مدل SSM گزارش کرده‌اند. به عنوان نمونه، در پارامتریابی سویا در ایران با استفاده از مدل SSM_iCrop2 با مقایسه روز تا رسیدگی پیش‌بینی‌شده در برابر مشاهده‌شده با مقادیر RMSE، CV و r به ترتیب ۱۲ روز، ۹ درصد و ۰/۶۰ نتیجه‌گیری شد که مدل SSM_iCrop2 روز تا رسیدگی سویا در ایران را با دقت قابل قبولی پیش‌بینی می‌کند (Nehbandani *et al*., 2020). در پیش‌بینی رشد سیب‌زمینی در ایران با استفاده از SSM_iCrop2 با مقایسه روز تا رسیدگی پیش‌بینی‌شده در برابر مشاهده‌شده در پارامتریابی، مقادیر RMSE، CV و r به ترتیب ۲۴ روز، ۱۹ درصد و ۰/۳۴ نتایج شبیه‌سازی قابل‌قبول گزارش شد (Dadrasi *et al*., 2020). در مطالعه دیگری نسبت بین مقادیر روز تا رسیدگی پیش‌بینی‌شده به مشاهده‌شده سویا در شرایط گرگان با استفاده از مدل SSM، با RMSE برابر با ۸/۷ روز، CV برابر با ۶ درصد و r برابر با ۰/۷۲ نشان داد این مدل توانسته با دقت زیادی روز تا رسیدگی سویا را پیش‌بینی نماید (Nehbandani *et al*., 2016). مدل SSM در شبیه‌سازی روز تا رسیدگی بادام‌زمینی در شمال ایران با مقادیر RMSE، CV و r به ترتیب برابر با ۷/۲ روز، ۵/۴ درصد و ۰/۴۶ روز تا رسیدگی را به‌طور صحیح تخمین زد (Noorhosseini *et al*., 2018).

جدول ۵- پارامترهای مربوط به فنولوژی در مدل SSM_iCrop2 برای لوبیا در ایران
Table 5. Phenology parameters in SSM_iCrop2 model for bean in Iran

پارامتر **Parameter**	مقدار **Value**	منابع **References**
دمای پایه برای نمو Base temperature for development (TBD, ºC)	8	سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲) Soltani & Sinclair (2012)
دمای مطلوب اول برای نمو Lower optimum temperature for development (TP1D, ºC)	30	سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲) Soltani & Sinclair (2012)
دمای مطلوب دوم برای نمو Upper optimum temperature for development (TP2D, ºC)	35	سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲) Soltani & Sinclair (2012)
دمای سقف برای نمو Ceiling temperature for development (TCD, ºC)	45	سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲) Soltani & Sinclair (2012)
واحد دمایی برای برداشت Temperature unit for harvest index (tuHAR, ºC)	1300-2200	جدول ۴ Table 4
واحد دمایی برای سبزشدن Temperature unit for emergence (tuEMR, ºC)	56-99	جدول ۴ Table 4
واحد دمایی برای شروع رشد دانه Temperature unit for beginning seed growth occurs (tuBSG, ºC)	715-1265	جدول ۴ Table 4
واحد دمایی برای پایان رشد دانه Temperature unit for termination seed growth occurs (tuTSG, ºC)	1259-2228	جدول ۴ Table 4
واحد دمایی برای شروع پیرشدن برگ‌ها Temperature unit for maturity that leaves start senescence (tuBLS, ºC)	715-1265	جدول ۴ Table 4

عملکرد دانه: پارامترهای مورد استفاده برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد لوبیا در جدول ۷ نشان داده شده‌اند. نتایج پارامتریابی مدل در مقایسه بین مقادیر پیش‌بینی‌شده در برابر مشاهده‌شده عملکرد دانه با RMSE، CV و r به ترتیب ۶۲گرم در متر مربع، ۲۰ درصد و ۰/۸۴ نشان داد پارامترهای مورد استفاده، صحیح هستند. بسیاری از داده‌های عملکرد در دامنه ۲۰ درصد بالا و پایین خط ۱:۱ قرار گرفته‌اند (شکل ۲). دامنه تغییرات عملکرد دانه لوبیا در پارامتریابی برای هردو عملکرد مشاهده‌شده و پیش‌بینی‌شده بسیار به هم نزدیک و بین ۱ تا ۵تن در هکتار با میانگین ۳ تن در هکتار بود که نشان‌دهنده صحت پارامترهای مورد استفاده در تخمین عملکرد لوبیای معمولی در ایران به وسیله مدل SSM_iCrop2 می‌باشد.

مدل SSM_iCrop2 توانست به خوبی عملکرد سویا در ایران را نیز پیش‌بینی کند. در پارامتریابی سویا با استفاده از مدل SSM_iCrop2 برای استان‌های مهم تولیدکننده این محصول در ایران، مقادیر RMSE، CV و r برای عملکرد دانه پیش‌بینی‌شده در برابر مشاهده‌شده به ترتیب ۰/۴۸ تن در هکتار، ۱۴ درصد و ۰/۶۳ بود (Nehbandani *et al*., 2020). در پارامتریابی مدل SSM_iCrop2 برای سیب‌زمینی در شرایط اقلیمی ایران، مقادیر RMSE، CV و r به ترتیب ۷۷۹گرم در متر مربع، ۱۹ درصد و ۰/۷۴ و در نتیجه درستی پارامترها و دقت مدل، قابل‌قبول گزارش شد (Dadrasi *et al*., 2020). مقادیر RMSE، CV و r در مقایسه عملکرد دانه پیش بینی‌شده در برابر مشاهده‌شده سویا در شرایط اقلیمی گرگان با استفاده از مدل SSM-iLegume، به ترتیب برابر با ۴۸ گرم در متر مربع، ۱۵ درصد و ۰/۸۰ گواه دقت بالای مدل SSM-iLegume برای پیش‌بینی عملکرد دانه سویا می‌باشد (Nehbandani *et al*., 2016). در شبیه‌سازی عملکرد دانه بادام‌زمینی در شمال ایران به وسیله مدل SSM، مقادیر RMSE، CV و r به ترتیب برابر با ۴۴/۷ گرم در متر مربع، ۲۱درصد و ۰/۵۵ بود که نشان می‌دهد مدل SSM عملکرد بادام‌زمینی را نسبتاً درست پیش‌بینی کرده است (Noorhosseini *et al*., 2018). Soltani & Sinclair, (2015)، در پیش‌بینی عملکرد گندم در گرگان با استفاده از مدل SSM با مقادیر RMSE،CV و r به ترتیب ۳۷/۷ گرم در مترمربع، ۸/۴ درصد و ۰/۸۹ مدل SSM را ابزاری توانمند و دقیق در پیش‌بینی عملکرد گندم در گرگان توصیف نمودند. ایشان چهار مدل SSM ، CropSyst ، APSIM و DSSAT را در پیش‌بینی عملکرد گندم مقایسه کردند و به این نتیجه رسیدند که SSM در پیش‌بینی رشد، نمو و عملکرد گندم دقیق‌تر از مدل‌های دیگر بود. همچنین، تعداد پارامترهای ورودی در SSM (۵۵ پارامتر) در مقایسه با مدل APSIM (۲۹۲ پارامتر) و مدل DSSAT (۲۱۱ پارامتر) بسیار کمتر بود. مدل SSM_iCrop2 برای شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاه به حداکثر ۳۷ پارامتر برای هر گیاه نیاز دارد که به پنج گروه تقسیم می شوند: (۱) فنولوژی با ۱۰پارامتر، (۲) سطح برگ با

۹پارامتر، (۳) تجمع ماده خشک با هفت پارامتر، (۴) تشکیل عملکرد با سه پارامتر و (۵) روابط آب با هشت پارامتر (Soltani *et al.*, 2020a). در شبیه‌سازی رشد و عملکرد گیاهان زراعی و باغی اصلی ایران که توسط Soltani *et al*, (2020a) انجام شد فقط سه پارامتر از ۳۷ پارامتر که پارامترهای وابسته به رقم هستند، برای تمایز بین ارقام درون یک گونه کافی بود، یعنی (۱) واحد دما از کاشت تا برداشت، (۲) حداکثر سطح برگ گیاه و (۳) شیب افزایش خطی شاخص برداشت (یا حداکثر شاخص برداشت در شرایط مطلوب). پارامترهای دیگر وابسته به گونه هستند که ممکن است برای همه ارقام موجود در یک گونه ثابت بمانند.

جدول ۶- پارامترهای مربوط به تغییرات شاخص سطح برگ در مدل SSM_iCrop2 برای لوبیا در ایران

Table 6. Parameters related to the changes in leaf area in SSM_iCrop2 model for bean in Iran

پارامتر **Parameter**	مقدار **Value**	منابع **References**
واحد دمایی از کاشت تا ۵درصد حداکثر شاخص سطح برگ Temperature unit from sowing to 5% of maximum LAI (x1)	0.01	جدول ۴ Table 4
شاخص سطح برگ نسبی در زمان سبزشدن Relative LAI at emergence (y1)	0.15	جدول ۴ Table 4
واحد دمایی از کاشت تا ۹۵درصد حداکثر شاخص سطح برگ Temperature unit from sowing to 95% of maximum LAI (x2)	0.50	جدول ۴ Table 4
شاخص سطح برگ نسبی در شروع رشد دانه Relative LAI at beginning seed growth occurs (y2)	0.95	جدول ۴ Table 4
حداکثر شاخص سطح برگ Maximum leaf area index (LAIMX)	2-3.25	جدول ۴ Table 4
ضریب سرعت پیری برگ Leaf senescence rate coefficient (SRATE)	1	جدول ۴ Table 4
دمای پایین/ آستانه انجماد برای مرگ برگ Low temperature/freezing threshold for leaf death (ºC) FrzTh	8	سلطانی، ۱۳۸۸ Soltani, (2009)
میزان مرگ برگ در هر درجه سانتی‌گراد زیر FrzTh Leaf death rate per ºC below FrzTh (cm^2 $ºC^{-1}$)FrzLDR	0.01	سلطانی، ۱۳۸۸ Soltani, (2009)
آستانه دمایی گرما برای مرگ برگ Heat threshold temperature for leaf death (ºC) HeatTH	37	سلطانی، ۱۳۸۸ Soltani, (2009)
میزان مرگ برگ در هر درجه سانتی‌گراد بالاتر از HeatTh Leaf death rate per ºC above HeatTh (cm^2 $ºC^{-1}$) HtLDR	0.1	سلطانی، ۱۳۸۸ Soltani, (2009)

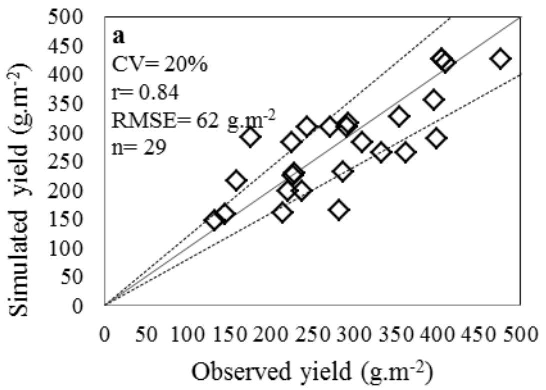
دامنه عادات رشدی (از انواع بوته‌ای رشدمحدود تا رونده رشد نامحدود) و دامنه طول چرخه‌های رشد (از ۲ تا ۱۰ ماه)، لوبیای معمولی را به محصولی تبدیل می‌کند که نیچ‌های تولیدی بسیاری دارد. عملکرد دانه انواع بوته‌ای لوبیا می‌تواند چهار تن در هکتار یا بیشتر باشد، در حالی که انواع رونده لوبیا در سیستم‌های کشت داربستی می‌توانند تا شِش تن در هکتار عملکرد داشته باشند (Beebe *et al.*, 2013). علاوه بر این، ارقام لوبیا به شرایط اقلیمی و رشدی مختلف، واکنش‌های متفاوتی نشان می‌دهند و این عوامل تخمین صحیح فنولوژی و عملکرد لوبیا در مقیاس بزرگ را پیچیده و دشوار می‌کند و به نظر می‌رسد تعداد بیشتری پارامتر وابسته به رقم برای نشان دادن این تفاوت‌های درون‌گونه‌ای لازم باشد. با وجود این، شبیه‌سازی رشد و عملکرد ارقام مختلف لوبیای معمولی با وجود تفاوت‌های زیاد ژنوتیپی و فنوتیپی و در مقیاس کشور با پارامتر واحد دما از کاشت تا برداشت شامل tuBLS، tuTSG، tuBSG، tuEMR و tuHAR (جدول ۵)، پارامتر LAIMX (جدول ۶) و پارامتر HImax (جدول ۷) انجام شد و ارقام از لحاظ عملکرد و طول دوره رشد به خوبی از یکدیگر متمایز شدند.

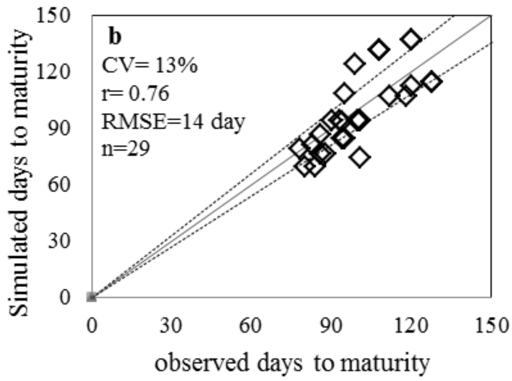
تعداد کم پارامترهای وابسته به رقم به این معنی نیست که برای سایر پارامترها تنوع ژنتیکی وجود ندارد، بلکه نشان می‌دهد در سطحی که مدل SSM_iCrop2 فرایندهای محصول را توصیف می‌کند، ارقام رایج هر گونه تخمین‌های مشترکی را برای بسیاری از پارامترها به اشتراک می‌گذارند. در صورت لزوم در مدل SSM_iCrop2 تمام پارامترها برای ارقام جدید قابل‌تغییر هستند (Soltani *et al.*, 2020a).

جدول۷- پارامترهای تولید ماده خشک و تشکیل عملکرد در مدل SSM_iCrop2 برای لوبیا در ایران

Table 7. Parameters of dry matter production and yield formation in SSM_iCrop2 model for bean in Iran

پارامتر Parameter	مقدار Value	منابع References
دمای پایه برای تولید ماده خشک Base temperature for dry matter production (TBRUE, ºC)	5	سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲) Soltani & Sinclair (2012)
حداقل دمای مطلوب برای تولید ماده خشک Lower optimum temperature for dry matter production (TP1RUE, ºC)	25	سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲) Soltani & Sinclair (2012)
حداکثر دمای مطلوب برای تولید ماده خشک Upper optimum temperature for dry matter production (TP2RUE, ºC)	37	سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲) Soltani & Sinclair (2012)
دمای سقف برای تولید ماده خشک Ceiling temperature for dry matter production (TCRUE, ºC)	45	سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲) Soltani & Sinclair (2012)
ضریب خاموشی برای PAR Extinction coefficient for PAR (KPAR)	0.65	سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲) Soltani & Sinclair (2012)
کارآیی استفاده از تابش تحت شرایط مطلوب رشد Radiation use efficiency under optimal growth conditions (IRUE, g MJ^{-1})	2	سلطانی و سینکلر (۲۰۱۲) Soltani & Sinclair (2012)
حداکثر شاخص برداشت/شیب افزایش خطی شاخص برداشت The slope of linear increase in harvest index/maximum harvest index (HImax, g g^{-1} d^{-1})	0.25-0.5	جدول ۴ Table 4
محتوای رطوبت دانه Grain moisture content (MC, %, dwb)	12	ثابت برای لوبیا Fixed for bean





شکل ۲- عملکرد دانه (a) و روز تا رسیدگی (b) شبیه‌سازی‌شده در برابر مشاهده‌شده لوبیا با استفاده از مدل SSM_iCrop2 بر اساس داده‌های مورد استفاده در پارامتریابی

خطوط اختلاف ۲۰± درصد برای عملکرد و ۱۰± درصد برای روز تا رسیدگی با خطوط منقطع نشان داده شده است. خط ممتد خط ۱:۱ است.

Fig. 2. Simulated versus observed grain yield (a) and days to maturity (b) by SSM_iCrop2 model based on data used in model parameterization

The ±20% for yield and ±10% for days to maturity discrepancy lines are indicated by dashed lines. Solid line is 1:1 line.

ارزیابی مدل

روز تا رسیدگی (فنولوژی): با مقایسه روز تا رسیدگی پیش‌بینی‌شده در برابر مشاهده‌شده در ارزیابی مدل SSM_iCrop2، مقادیر RMSE، CV و r به ترتیب ۸ روز، ۸درصد و ۰/۷۴ برآورد شد و اکثر نقاط در محدوده خط ۱:۱ و حدود اطمینان ۱۰ درصد قرار گرفت (شکل ۳). دامنه تغییرات تعداد روز تا رسیدگی لوبیا برای داده‌های مشاهده‌شده مورد استفاده در ارزیابی مدل از ۶۴ تا ۱۱۷ با میانگین ۹۷ روز و برای داده‌های پیش‌بینی‌شده از ۷۶ تا ۱۱۹ با میانگین ۹۷ روز بود. بنابراین، با توجه به نتایج ارزیابی مدل SSM_iCrop2، این مدل روز تا رسیدگی لوبیا را در ایران با دقت بالایی پیش‌بینی کرد.

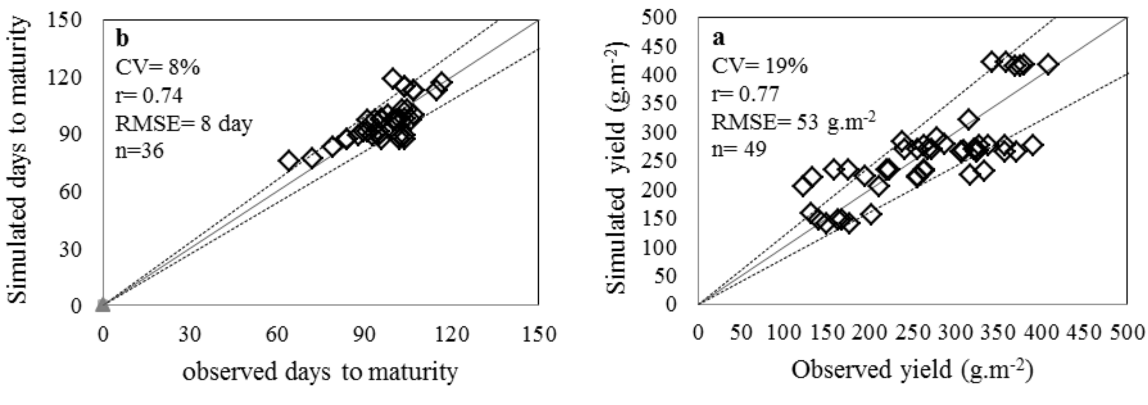
در ارزیابی مدل SSM-iCrop در شبیه‌سازی مراحل فنولوژی باقلا در گرگان نیز با مقایسه بین روز تا رسیدگی

پیش‌بینی‌شده در برابر مشاهده‌شده با مقادیر RMSE، CV و r به ترتیب برابر با ۱۱/۹ روز، ۸/۹ درصد و ۰/۹۴ دقت مدل قابل قبول گزارش شد (Torabi *et al.*, 2020).

عملکرد: در مقایسه عملکرد دانه پیش‌بینی‌شده در برابر مشاهده‌شده در ارزیابی مدل، مقادیر RMSE، CV و r به ترتیب ۵۳ گرم در متر مربع، ۱۹ درصد و ۰/۷۷ محاسبه شد و بیشتر نقاط در محدوده خط ۱:۱ و حدود اطمینان ۲۰ درصد قرار گرفت (شکل ۳). دامنه تغییرات عملکرد دانه در ارزیابی برای داده‌های مشاهده‌شده به ترتیب بین ۱/۲ تا ۴ با میانگین ۲/۷ تن در هکتار و برای داده‌های پیش‌بینی‌شده به ترتیب بین ۱/۴ تا ۴/۲ با میانگین ۲/۶ تن در هکتار بود. بنابراین، با توجه به نتایج ارزیابی مدل SSM_iCrop2، این مدل عملکرد دانه لوبیا را در شرایط ایران با دقت قابل قبولی پیش‌بینی کرد.

در ارزیابی مدل SSM_iCrop2، عملکرد دانه پیش بینی‌شده در برابر مشاهده‌شده سویا در ایران با مقادیر RMSE، CV و r به ترتیب ۰/۴۶ تن در هکتار، ۱۳ درصد و ۰/۸۴ برآورد شد و گزارش شد که مدل SSM_iCrop2 عملکرد سویا در ایران را با دقت بالایی پیش‌بینی می‌کند (Nehbandani *et al.*, 2020). ارزیابی مدل SSM_iCrop2 در شبیه‌سازی عملکرد سیب‌زمینی در ایران با RMSE، CV و r به ترتیب برابر با ۵۴۳ گرم در متر مربع، ۱۴ درصد و ۰/۸۰ نشان داد، این مدل می‌تواند عملکرد سیب‌زمینی در ایران را تا حد زیادی درست پیش‌بینی کند (Dadrasi *et al.*, 2020). نتایج ارزیابی مدل SSM-iCrop در پیش‌بینی عملکرد باقلا در گرگان نیز با RMSE، CV و r به ترتیب برابر با ۱۱۸/۶ گرم بر متر مربع، ۲۴/۷ درصد و ۰/۷۳ کارآیی مدل را در پیش‌بینی عملکرد تأیید نمود (Torabi *et al.*, 2020). همچنین Marrou *et al*, (2014)، عملکرد لوبیا را با استفاده از مدل SSM-Legumes با RMSE برابر با ۴۱ گرم در متر مربع شبیه‌سازی کردند. آن‌ها بیان داشتند که هیچ‌گونه اریبی در آزمون t برای پیش‌بینی عملکرد با استفاده از این مدل وجود نداشت. بنابراین با توجه به نتایج این مطالعه و مطالعات مشابه، مدل SSM به سهولت و با دقت زیاد رشد و عملکرد محصولات را شبیه‌سازی می‌کند.

تبخیر و تعرق(ET): مقدار RMSE برای ET برابر با ۶۳میلی‌متر در هکتار معادل ۱۱ درصد میانگین ETمشاهده‌شده بود. مقدار r و CV برای مقایسه بین مقادیر شبیه‌سازی شده و مشاهده‌شده ET به ترتیب برابر با ۰/۸۵ و ۱۱ درصد بود. بر اساس نتایج، بیشتر نقاط در دامنه ۲۰ درصد بالا و پایین خط ۱:۱ قرار داشتند (شکل ۴). این نتایج نشان داد مدل SSM_iCrop2 تبخیر و تعرق گیاه زراعی لوبیا را برای مناطق مهم تولیدکننده این گیاه در ایران با دقت بالایی پیش بینی می‌کند. طبق نتایج مطالعات Soltani *et al*, (2020a) این مدل مقادیر آب آبیاری خالص یا ET گیاهان زراعی دانه‌ای و غیردانه‌ای مهم ایران را به‌خوبی شبیه‌سازی کرد.

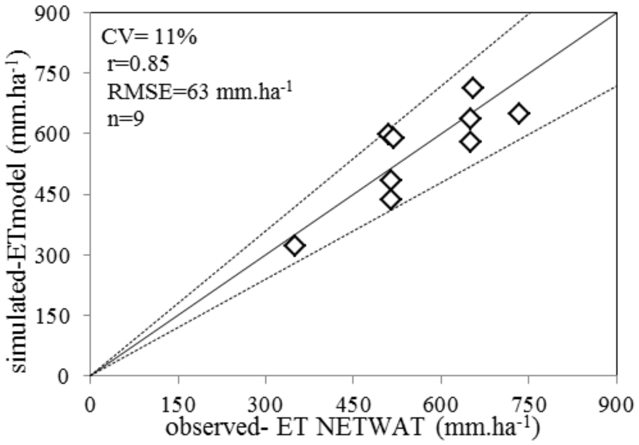


شکل ۳- عملکرد دانه (a) و روز تا رسیدگی (b) شبیه‌سازی‌شده در برابر مشاهده‌شده با استفاده از مدل SSM_iCrop2 بر اساس داده‌های مورد استفاده در ارزیابی مدل

خطوط اختلاف ۲۰± درصد برای عملکرد و ۱۰± درصد برای روز تا رسیدگی با خطوط منقطع نشان داده شده است. خط ممتد خط ۱:۱ است.

Fig. 3. Simulated versus observed grain yield (a) and days to maturity (b) by SSM_iCrop2 model based on data used in model evaluation

The ±20% for yield and ±10% for days to maturity discrepancy lines are indicated by dashed lines. Solid line is 1:1 line.



شکل ۴- تبخیر و تعرق (ET) شبیه‌سازی شده در برابر ET مشاهده‌شده استخراج شده از نرم‌افزار NETWAT، با استفاده از مدل SSM_iCrop2 در مناطق مهم تولیدکننده لوبیا در ایران

خطوط اختلاف ۲۰± درصد با خطوط منقطع نشان داده شده است. خط ممتد خط ۱:۱ است.

Fig. 4. Observed VS simulated evapotranspiration (ET) obtained from NETWAT software using SSM_iCrop2 model in major bean production regions in Iran

The ±20% discrepancy lines are indicated by dashed lines. Solid line is 1:1 line.

نتیجه‌گیری

در این مطالعه، پارامترهای مربوط به سطح برگ، ماده خشک، فنولوژی و عملکرد لوبیای معمولی در ایران با استفاده از مدل SSM_iCrop2 با دقت بالایی برآورد شد. مدل توانست رشد و عملکرد لوبیای معمولی را با وجود عادات رشدی متفاوت و تنوع ژنتیکی و به دنبال آن تنوع فنوتیپی زیاد در ارقام مختلف، با تعداد پارامترهای کم و در دسترس با موفقیت شبیه سازی کند. نتایج ارزیابی مدل SSM_iCrop2 که با استفاده از شاخص‌های جذر میانگین مربعات خطا (RMSE)، ضریب همبستگی (r) و ضریب تغییرات (CV) انجام گرفت، نشان داد که این مدل می‌تواند زمان رسیدگی و عملکرد دانه لوبیا را در تاریخ کاشت‌های مختلف در شرایط اقلیمی ایران با دقت زیادی شبیه‌سازی کند. همچنین، تبخیر و تعرق شبیه‌سازی‌شده با استفاده از مدل می‌تواند برای برآورد نیاز آبی و بهره‌وری آب لوبیای معمولی در نقاط مختلف کشور مورد استفاده قرار گیرد. بنابراین با توجه به نتایج به‌دست‌آمده می‌توان از مدل SSM_iCrop2 برای پیش‌بینی رشد و عملکرد لوبیا در شرایط پتانسیل بهره برد. این مدل می‌تواند در مطالعات شبیه‌سازی عملکرد لوبیا و محدودیت‌های آن در واکنش به شرایط محیط زیستی، ورودی‌های مدیریتی و عوامل ژنتیکی در شرایط ایران مورد استفاده قرار گیرد.

منابع

1. Aiking, H. 2011. Future protein supply. Trends in Food Science & Technology 22: 112-120.
2. Amir, J., and Sinclair, T.R. 1991. A model of water limitation on spring wheat growth and yield. Field Crops Research 28(1-2): 59-69.
3. Assady, B., Dorri, H.R., and Ghadiri, A. 2011. Evaluation of chitti bean genotyps to drought stress using stress tolerance indices. Seed and Plant Improvement Journal 27-1(4): 615-630. (In Persian with English Summary).
4. Beebe, S.E., Rao, I.M., Blair, M.W., and Acosta-Gallegos, J.A. 2013. Phenotyping common beans for adaptation to drought. Frontiers in Physiology 4: 35.
5. Dadrasi, A., Torabi, B., Rahimi, A., Soltani, A., and Zeinali, E. 2020. Parameterization and evaluation of a simple simulation model (SSM_iCrop2) for potato (*Solanum tuberosum* L.) growth and yield in Iran. Potato Research 63: 545-563.
6. Ghanbari Motlaq, M., Rastgoo, M., Pouryousef, M., and Saba, J. 2012. The effect of sowing date and weed interference on growth indices of different red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) cultivars. Journal of Plant Protection 25(4): 378-390. (In Persian with English Summary).

7. Ghanbari, A.A. 2015. Developmental stages and phenology of common bean genotypes under normal irrigation and water deficit conditions. Agronomy Journal 28(107): 190-199. (In Persian with English Summary).
8. Ghanbari, A.A., Mousavi, S.H., Keshavarz, S., and Abbasian, A. 2014. Assessment of variation in physiological growth indices in common bean genotypes under water deficit condition. Seed and Plant Production 30(2): 199-222. (In Persian with English Summary).
9. Godfray, H.C.J., Beddington, J.R., Crute, I.R., Haddad, L., Lawrence, L., Muir, J.F., Pretty, J., Robinson, S., Thomas, S.M., and Toulmin, C. 2010. Food Security: the challenge of feeding 9 billion people. Science 327: 812-818.
10. Hoogenboom, G., Jones, J.W., and Wilkens, P.W. 2004. Decision Support System for Agrotechnology Transfer Version 4.0. Honolulu, HI: Univ. Hawaii.
11. Hydari, S., Sajedi, N.A., and Madani, M.J. 2015. The effects of integrated management on yield, yield components and weed control of bean. Iranian Journal of Pulses Research 6(2): 139-150. (In Persian with English Summary).
12. Jamieson, P.D., Semenov, M.A., Brooking, I.R., and Francis, G.S. 1998. Sirius: a mechanistic model of wheat response to environmental variation. European Journal of Agronomy 8: 161-179.
13. Jamshidi, M., Danesh-Shahraki, A., and Hashemi-Jazi, M. 2016. Effect of foliar application of manganese and zinc on grain yield and yield components of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in drought conditions. Iranian Journal of Pulses Research 7(2): 164-174. (In Persian with English Summary).
14. Karimzadeh, H., Nezami, A., Kafi, M., and Tadayon, M.R. 2017. Effects of deficit irrigation on yield and yield components of pinto bean genotypes in Shahrekord. Iranian Journal of Pulses Research 8(1): 113-126. (In Persian with English Summary).
15. Koo, J., and Dimes, J. 2013. HC27 Generic Soil Profile Database. http://hdl.handle.net/1902.1/20299, Harvard Data verse, V4.
16. Lobell, D.B., Cassman, K.G., and Field, C.B. 2009. Crop yield gaps: Their importance, magnitudes, and causes. Annual Review of Environment and Resources 34: 179-204.
17. Majnoon Hosseini, N. 2008. Agriculture and Production of Legumes. Tehran University Jahad Publications. (In Persian)
18. Marrou, H., Sinclair, T.R., and Metral, R. 2014. Assessment of irrigation scenarios to improve performances of Lingot bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in southwest France. European Journal of Agronomy 59: 22-28.
19. Mehrpouyan, M., Faramarzi, A., Jaefari, A., and Siyami, K. 2010. The effect of different methods and different dates of sowing on yield and yield components in two cultivars of common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Iranian Journal of Pulses Research 1(1): 9-17. (In Persian with English Summary).
20. Mehrpoyan, M., and Shirani Rad, A.H. 2011. Comparing the biological nitrogen fixation efficiency, in native and non-native strains of *Rhizobium leguminosarum*; bv. phaseoli in common bean. Iranian Journal of Pulses Research 2(2): 109-120. (In Persian with English Summary).
21. Ministry of Agriculture Jahad. 2016. Agricultural Statistics. [WWW Document], n.d. URL https://www.maj.ir/ (Accessed 6/29/20).
22. Mirhashemi Aghdam, R.S., Tadyon, M.S., and Zade Bagheri, M. 2014. Evaluation of competitiveness of different bean cultivars and pigweed as affected by nitrogen. Plant Ecophysiology 5(15): 49-62. (In Persian with English Summary).
23. Mohajerani, S.S., Alavi Fazel, M., Madani, H., Lack, S., and Modhej, A. 2016. Yield and physiological response of red bean genotypes (*Phaseolus vulgaris* L.) to cutting irrigation off at different growth stages. Journal of Crop Ecophysiology 10(1): 213-224. (In Persian with English Summary).
24. Nehbandani, A., Soltani, A., Nourbakhsh, F., and Dadrasi, A. 2020. Estimating crop model parameters for simulating soybean production in Iran conditions. Oilseeds and Fats, Crops and Lipids 27: 58.
25. Nehbandani, A., Soltani, A., Zeinali, E., Raisi, S., and Rajabi, R. 2016. Parameterization and evaluation of SSM-soybean model for prediction of growth and yield of soybean in Gorgan. Journal of Plant Production Research 22(3): 1-26. (In Persian with English Summary).
26. Noorhosseini, A., Soltani, A., and Ajamnoroozi, H. 2018. Simulating peanut (*Arachis hypogaea* L.) growth and yield with the use of the Simple Simulation Model (SSM). Computers and Electronics in Agriculture 145: 63-75.

27. Omidi, F., and Sepehri, A. 2015. Effect of Sodium Nitroprusside application on leaf area, growth and water use efficiency of Kidney bean under water deficit stress. Journal of Crops Improvement 6(4): 871-885. (In Persian with English Summary).
28. Parvizi, S., Amirnia, R., Bernosy, I., Paseban Islam, B., Hasanzadeh Gorttapeh, A., and Raeii, Y. 2011. Evaluation of different plant densities effects on rate and process of grain filling, yield and yield components in varieties of dry bean. Journal of Plant Production 18(1): 69-86. (In Persian with English Summary).
29. Rahmani, T., Heidari Sharifabad, H., and Madani, H. 2012. Effect of planting date and comparing yield between red bean cultivars in Ali-Ggoudarz , Lorestan, Iran. New Finding in Agriculture 6(4): 321-335. (In Persian with English Summary).
30. Rucell, G., Javis, P.G., and Monteith, J.L. 1989. Absorption of radiation by canopies and stand growth. p. 21-39 In: G. Russell, B. Marshall and P.G. Jarvis (Eds.). Plant Canopies: Their Growth, Form and Function. Cambridge University Press.
31. Sadeghipour, O., Ghaffari Khaligh, H., and Monem, R. 2005. Effect of plant density on yield and yield components of common bean determinate and indeterminate cultivars. Journal of Agricultural Sciences 11(1): 149-160. (In Persian with English Summary).
32. Sadeghipur, O., and Ghafarikhaligh, H. 2002. Effects of weeding and different herbicides on weed control in common bean (*Phaseolus vulgaris* L.). Iranian Journal of Crop Sciences 4(4): 277-282. (In Persian with English Summary).
33. Safapour, M., Khaghani, Sh., and Teymoori, M. 2012. Comparison of drought tolerance index on morphological and agronomical traits in black bean (*Phaseolus vulgaris* L.). New Finding in Agriculture 6(4): 337-349. (In Persian with English Summary).
34. Salehi, F. 2015. Principles of bean cultivation. Agricultural Education and Natural Resources Research Publications p. 2. (In Persian).
35. Salehi, M., Akbari, R., and Khorshidi Benam, M.B. 2008. A study on response of yield and seed yield components of red bean (*Phaseolus vulgaris* L.) genotypes to delay in planting in Miyaneh region. Journal of Water and Soil Science 12(43): 105-115. (In Persian with English Summary).
36. Sinclair, T.R. 2006. A reminder of the limitations in using Beer's law to estimate daily radiation interception by vegetation. Crop Science 46: 2343-2347.
37. Sinclair, T.R., Kitani, S., Hinson, K., Bruniard, J., and Horie, T. 1991. Soybean flowering date: linear and logistic models based on temperature and photoperiod. Crop Science 31: 786-790.
38. Sinclair, TR., Soltani, A., Marrou, H., Ghanem, M., and Vadez, V. 2020. Geospatial assessment for crop physiological and management improvements with examples using the simple simulation model. Crop Science 60: 700-708.
39. Singh, S.P. 1999. Developments in plant breeding: Common Bean Improvement in the Twenty-First Century. Kluwer Academic Publishers, the Netherlands. 409 p.
40. Soltani, A. 2009. Mathematical Modeling of the Crop. Mashhad University Jahad Publications, p. 175. (In Persian)
41. Soltani, A., and Hoogenboom, G. 2007. Assessing crop management options with crop simulation models based on generated weather data. Field Crops Research 103: 198-207.
42. Soltani, A., and Sinclair, T. 2015. A comparison of four wheat models with respect to robustness and transparency: Simulation in a temperate, sub-humid environment. Field Crops Research 175: 37-46.
43. Soltani, A., and Sinclair, T.R. 2012. Modeling Physiology of Crop Development, Growth and Yield. Cabi, P. 322.
44. Soltani, A., Alimagham, M., Nehbandani, A., Zand, E., Bagheri, A.R., Rahimian, H., Fattah-Taleghani, D., and Ahmadi, K. 2016. Preparing a model for simulating the country's agricultural policy and evaluating food security with it by 2050. Agricultural Research Education and Extension Organization. (In Persian).
45. Soltani, A., Alimagham, S., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., and Dadrasi, A. 2020a. SSM_iCrop2: A simple model for diverse crop species over large areas. Agricultural Systems 182: 102855.
46. Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., Vadez, V., van Loon, M.P., and van Ittersum, M.K. 2020b. Future food self-sufficiency in Iran: A model-based analysis. Global Food Security 24: 100351.

47. Soltani, A., Alimagham, S.M., Nehbandani, A., Torabi, B., Zeinali, E., Zand, E., Ghassemi, S., Vadez, V., Sinclair, T.R., and van Ittersum, M.K. 2020c. Modeling plant production at country level as affected by availability and productivity of land and water. Agricultural Systems 183: 102859.
48. Soltani, A., and Sinclair, T.R. 2011. A simple model for chickpea development, growth and yield. Field Crops Research 124: 252-260.
49. Soltani, A., Gholipoor, M., and Hajizadeh, H. 2005. SBEET: A simple model to simulate growthand yield of sugar beet. Agricultural Science and Technology 19: 11-26.
50. Torabi, B., Ebrahimi, N., Soltani, A., and Zeinali, E. 2020. Parameterization and evaluation of SSM-iCrop model for prediction of growth and development of faba bean in climatic conditions of Gorgan. Journal of Crops Improvement 22(4): 531-542. (In Persian with English Summary).
51. Van Ittersum, M.K., Cassman, K.G., Grassini, P., Wolf, J., Tittonell, P., and Hochman, Z. 2013. Yield gap analysis with local to global relevance. A Review. Field Crops Research 143: 4-17.
52. Williams, J.R., Jones, C.A., Kiniry, J.R., and Spanel, D.A. 1989. The EPIC crop growth model. Transactions of ASAE 32: 497-510.
53. Zhang, H., Tao, F., and Zhou, G. 2019. Potential yields, yield gaps, and optimal agronomic management practices for rice production systems in different regions of China. Agricultural Systems 171: 100-112.

Iranian Journal of Pulses Research
Homepage: **https://ijpr.um.ac.ir**
Vol. 13, No. 1, June 2022, p. 37-54 (Original Research Article)

Parameterization and evaluation of SSM_iCrop2 model to simulate the growth and yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Iran

Mohammadi[1*], Samaneh; Zeinali[2], Ebrahim; Soltani[3], Afshin; and Torabi[4], Beniamin

1. PhD. Student of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources; fpp@gau.ac.ir; samamoh1367@gmail.com
2. Associate Professor, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources; e.zeinali@gau.ac.ir
3. Professor, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources; afshin.soltani@gau.ac.ir
4. Associate Professor, Department of Agronomy, Faculty of Plant Production, Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources; ben_torabi@yahoo.com

Received: 17 March 2021; **Revised:** 1 August 2021
Accepted: 19 October 2021; **Available Online:** 22 June 2022

How to cite this article:
Mohammadi, S., Zeinali, E., Soltani, A., and Torabi, B. 2022. Parameterization and evaluation of SSM_iCrop2 model to simulate the growth and yield of bean (*Phaseolus vulgaris* L.) in Iran Iranian Journal of Pulses Research 13(1): 37-54. (In Persian with English Summary). DOI: 10.22067/ijpr.v13i1.2103-1004

Introduction

Common bean (*Phaseolus vulgaris* L.) with 20-25% protein and 50-56% carbohydrate content, has a crucial role in supplying the required proteins and maintenance of food security of the community. Among the Asian countries, China, Iran, Japan and Turkey are the major producers of common bean. According to the figures provided by the Ministry of Agriculture, cultivation area and production of bean in Iran in 2016 were 114593 ha and 222705 tones, respectively. In recent years, due to the increase in the population and in order to rapidly meet the demand for more food as well as decision making at micro and macro-levels, simulation of crop growth and yield using the models has gained attention due to rapid preparation of the results, lowering the execution costs and the possibility of simulation under various climatic and management conditions. In order to model the growth stages and yield of bean using the figures of Iranian meteorology organization (minimum and maximum temperatures, radiation and rainfall), a study was conducted at Gorgan University of Agricultural Sciences and Natural Resources. The simple SSM_iCrop2 model was used for this study. This model has been tested and proved for a wide range of plant species. This model requires easily available and limited input information. The aim of this study was to parameterize and evaluate the SSM_iCrop2 model for simulation of growth and yield of common bean in order to investigate the effect of climatic, soil and crop management factors as well as determination of genetic coefficients under Iran conditions using the sub-models associated with phenology, dry matter production and distribution and the changes in leaf area.

Materials and Methods

SSM_iCrop2 model was used as the base of this study. Observed and simulated yield and days to maturity values were compared for parameterization and evaluation of the model. For this purpose, a series of experimental data (data associated with the growth and production of bean and reports from the published and unpublished papers) in major bean cultivation areas of the country were used. First, parameters related to phenology, leaf area, dry matter production, yield formation and water relations were estimated. Then, the model was evaluated using a series of data which were independent from the experimental data used for parameterization. Crop management inputs were also entered according to the experiment reports. For statistical analysis and investigation of model precision in comparison of the data recorded in the previous

*** Corresponding Author:** samamoh1367@gmail.com

studies with the data simulated by the model, correlation coefficient (r), root mean square error (RMSE) and coefficient of variation (CV) were calculated and 1:1 diagram was also drawn.

Results and Discussion

In parameterization of SSM_iCrop2 model for bean, the comparison of observed and simulated days to maturity with RMSE, CV and r values of respectively 14 days, 13 percent and 0.76 and comparison of observed and simulated grain yield with RMSE, CV and r values of 62 g m^{-2}, 20 percent and 0.84 indicated the accuracy of the used parameters. Furthermore, in the evaluation stage, RMSE, CV and r values for days to maturity were 8 days, 8 percent and 0.74 and for grain yield were 53 g m^{-2}, 19 percent and 0.77, respectively, which confirms the precision of the model simulation. The model simulated the evapotranspiration of been in a good manner. The values for RMSE, CV and r for the comparison of the observed and simulated evapotranspiration were 63 mm, 11 percent and 0.85, respectively. Application of SSM_iCrop2 model is simple and acceptably precise simulation is possible with minimal parameters and inputs. This model was able to simulate the growth period and yield of bean cultivars in a good manner despite high variations using thermal unit parameters form sowing to harvest, maximum leaf area and maximum harvest index.

Conclusion

Growth and yield of bean was successfully simulated using SSM_iCrop2 model using minimal and available parameters despite different growth habits and high phenotypic and genotypic variations among the cultivars. The results of the model evaluation performed using RMSE, r and CV showed that this model is able to simulate maturity time and grain yield of bean sown in various dates under Iran climatic conditions with a high precision. Thus, due to suitable precision of SSM_iCrop2 model in simulation of bean phenology and yield, it may be used as a suitable tool for investigation of crop systems and interpretation of results under various environmental and management conditions for planning and improving the management of bean fields in the country.

Keywords: Bean، Evapotranspiration، Grain yield، Leaf area، Phenology